

УДК 621.793

**ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ
ИЗ ПСЕВДОСПЛАВОВ МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ**

д-р техн. наук М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ;
канд. техн. наук А.Н. ГРИГОРЧИК
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);
А.П. ЯЛОВИК
(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк, Республика Беларусь);
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН
(Полоцкий государственный университет)

Исследованы особенности формирования псевдосплавных покрытий методом гиперзвуковой металлизации. Изучены структура и свойства покрытий, полученных одновременным распылением проволок из сталей мартенситного и аустенитного классов. Установлена связь между качеством покрытий, формируемых проволоками с различными температурами плавления, и соотношением их диаметров, а также полярностью подключения проволок к источнику сварочного тока.

Ключевые слова: псевдосплавы, гиперзвуковая металлизация, структура, триботехнические свойства.

Введение. Большинство методов газотермического напыления позволяют получать гетерофазные покрытия со структурой и свойствами, присущими композиционному материалу. В процессе гиперзвуковой металлизации (ГМ) двух разных по составу или разнородных проволок [1] формируется многокомпонентное покрытие, в котором частицы каждого из наносимых металлов или сплавов сохраняются индивидуально, хотя при металлизации они и находились в расплавленном состоянии. Подобные многокомпонентные покрытия называют псевдосплавными. Материалы типа псевдосплавов характеризуются рядом важных свойств – сочетанием высоких значений температуры плавления и испарения с механической прочностью, твердостью, демпфирующей способностью, износостойкостью, способностью к самосмазыванию в условиях сухого трения, а также высоким уровнем электро- и теплопроводности [2; 3]. Требуемые свойства псевдосплавов получают путем изменения соотношения компонентов.

Поскольку метод гиперзвуковой металлизации позволяет использовать для нанесения покрытий проволоки из различных сплавов и в достаточно широких пределах изменять диаметры распыляемых проволок, задачей исследования, результаты которого отражены в данной работе, явилось исследование особенностей процесса ГМ псевдосплавов из различных сталей и комбинаций «сталь – цветной металл».

Материалы, оборудование и методики исследований. Псевдосплавы из проволочных материалов наносились с использованием установки для гиперзвуковой металлизации АДМ-10, разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси [4]. В качестве горючего газа для формирования распыляющего факела использовался пропан. Материал распыляемых проволок: сталь мартенситного класса 40X13, сталь аустенитного класса 12X18Н10Т, бронза БрАЖ9-4, цинк Ц1, алюминий АМг3.

Электрические параметры металлизации, а также давление пропана и воздуха, подаваемых в камеру сгорания и образующих реактивную распыляющую струю, соответствовали паспортным данным установки АДМ-10.

Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Исследование фазового состояния напыленного псевдосплава осуществляли на дифрактометре ДРОН-2.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoK_α) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялось при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

Измерения твердости по Виккерсу выполнялись на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор (P), равной 10 г и 10 кг.

Триботехнические испытания образцов напыленного сплава проводились на трибометре АТВП. Испытания осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения $\approx 0,1$ м/с в режиме трения без смазочного материала (удельная нагрузка испытаний составляла $p = 1,5$ МПа). При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У8 (800 НВ10). Испытания проводились до достижения 20 000 циклов с промежуточными взвешиваниями. Путь трения составлял ≈ 1200 м.

Результаты исследований и их обсуждение. На первом этапе работы были выполнены исследования псевдосплава, получаемого распылением стальных проволок 40X13 и 12X18Н10Т. Установлено, что формируемое покрытие состоит не только из отдельных частиц мартенситной и аустенитной сталей,

но и из сплавленных частиц, имеющих разный химический состав. В частности, напыленные частицы псевдосплава имеют различное содержание углерода, хрома, никеля, железа и других легирующих элементов, что обуславливает отличия в их физико-механических свойствах.

Усредненный химический состав напыленного методом ГМ псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T представлен в таблице 1. Характерная микроструктура напыленного псевдосплава из высокохромистых сталей показана на рисунке 1.

Таблица 1. – Химический состав напыляемых проволок и усредненный состав напыленного псевдосплава

Материал	Концентрация элементов, масс.%						
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe
40X13	0,42	13,2	0,60	0,35	0,40	0,42	основа
12X18H10T	0,12	18,3	10,1	0,80	2,00	0,80	основа
Псевдосплав	0,2...0,3	15,7	3,97	–	0,75	0,44	основа

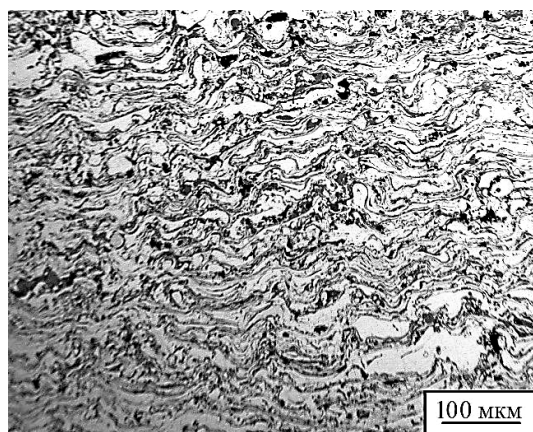


Рисунок 1. – Характерная микроструктура псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T

Фрагмент рентгеновской дифрактограммы от поверхностных слоев псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T представлен на рисунке 2.

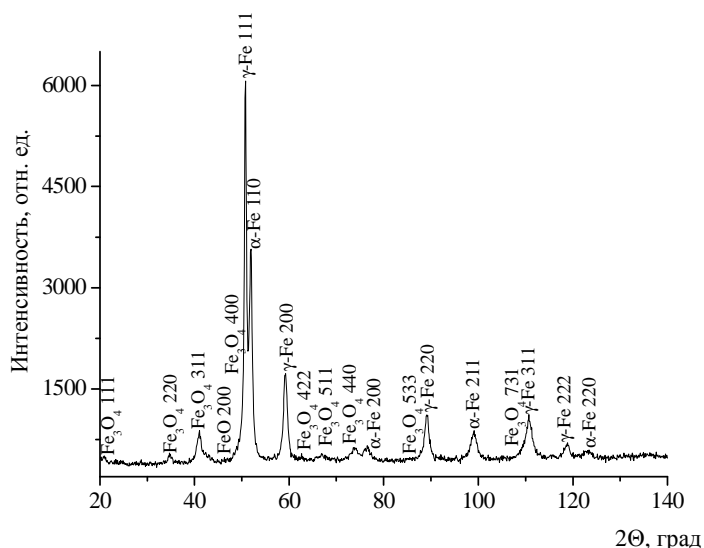


Рисунок 2. – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK α) от поверхностных слоев псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T

Как следует из дифрактограммы, фазовый состав псевдосплава включает в себя: γ -Fe (60 об.%), α -Fe (15 об.%), оксиды Fe_3O_4 и FeO (25 об.%). Повышенное количество аустенита в газотермическом псевдо-

сплаве связано с особыми условиями формирования покрытий при напылении [5], в результате которых протекает изотермическая выдержка напыляемых слоев при температурах, превышающих интервал мартенситного превращения. Кроме этого, дополнительная термическая стабилизация аустенитной фазы в псевдосплаве обеспечивается высоким содержанием в нем никеля (см. таблицу 1). Твердость напыленного псевдосплава составляет $\approx 370...380$ HV 10, что близко к твердости газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T [5].

Результаты триботехнических испытаний псевдосплава из высокохромистых сталей в условиях трения без смазочного материала представлены на рисунке 3. Кроме этого, на рисунке 3 приведены зависимости массового износа от пути трения для газотермических покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T [6].

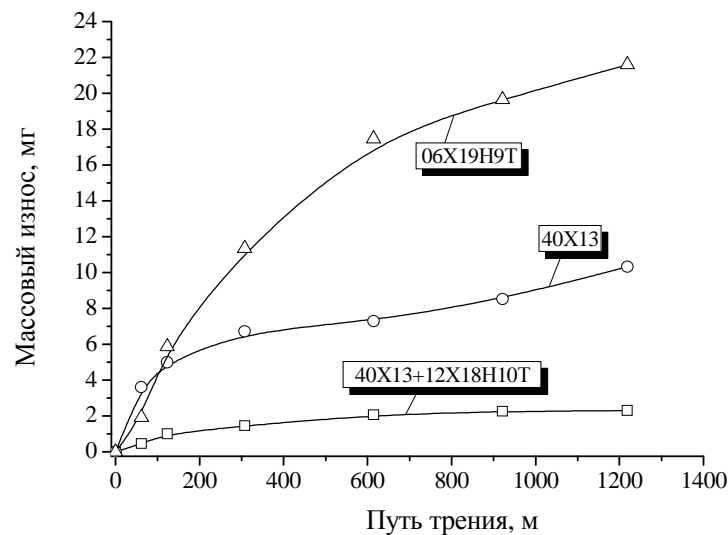


Рисунок 3. – Зависимости массового износа от пути трения для газотермических покрытий из сталей различных классов, а также псевдосплава из высокохромистых сталей

Анализ графиков, представленных на рисунке 3, показывает, что износостойкость при сухом трении псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T примерно в 3,8 раза и в 12,0 раз выше, чем у газотермических покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T, соответственно. При этом интенсивность массового изнашивания полученного гиперзвуковой металлзацией псевдосплава составляет около $1,2 \cdot 10^{-3}$ мг/м. В процессе фрикционного взаимодействия снижается содержание аустенитной фазы в поверхностных слоях псевдосплава до ≈ 45 об.%, а его микротвердость возрастает до ≈ 850 HV 0,01.

Предположено, что высокая износостойкость псевдосплава из двух сталей 40X13 и 12X18H10T достигается за счет деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, протекающего в процессе трения в поверхностных слоях покрытия (рисунок 4), а также за счет деформационного упрочнения γ -фазы и возможного ее насыщения азотом в процессе напыления [5; 6]. Кроме этого повышенные триботехнические свойства псевдосплава обеспечиваются наличием в нем частиц из мартенситной стали 40X13, которые обуславливают более высокую прочность покрытия. В частности, для случая трения без смазочного материала газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T, содержащего близкое количество γ -фазы (≈ 68 об.%), регистрируется повышенный износ (рисунок 3), обусловленный низкими прочностными свойствами напыленных частиц.

Таким образом, можно заключить, что псевдосплав на основе высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T, получаемый методом ГМ, может быть использован при восстановлении-упрочнении большого класса деталей, работающих в присутствии агрессивных сред.

На следующем этапе исследований изучались особенности формирования псевдосплавов: «сталь-алюминий»; «сталь-бронза»; «сталь-цинк»; «бронза – алюминий»; «бронза – цинк»; «алюминий – цинк»; при различном соотношении диаметров распыляемых проволок

В ходе исследования выявлено, что при подключении проволоки из более тугоплавкого материала к положительному потенциалу сварочного источника, использующегося в установке ГМ, равномерность распыления резко возрастала и достигала своего максимума при некотором увеличении диаметра легкоплавкой проволоки относительно тугоплавкой. Вероятней всего, это происходит в силу того, что с катода испускается поток электронов, который переносится на анод. В результате соударения электронов с ионами металла анода и происходит большее тепловыделение, чем на катоде [7].

В представленных ниже результатах проволока из материала, имеющего в выбранной паре большую температуру плавления, подключалась только к положительному полюсу сварочного источника ВДУ-506.

Оценивалась стабильность процесса ГМ и внешнее качество покрытий. Результаты исследований представлены в таблице 2.

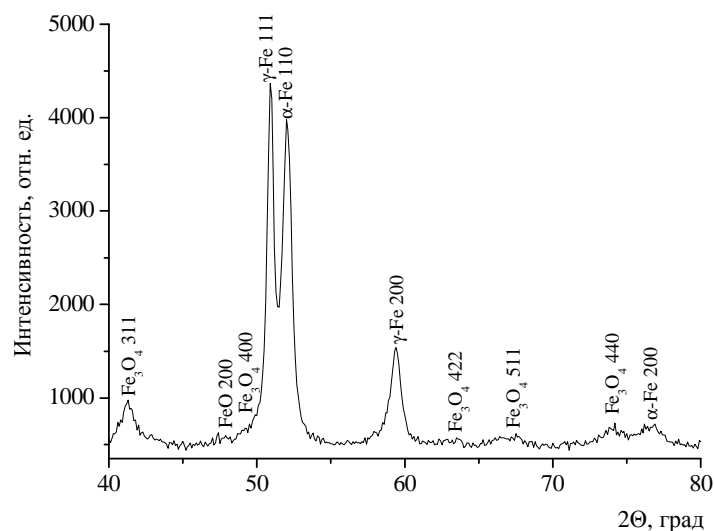


Рисунок 4. – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK α) от поверхностных слоев псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T после трения без смазки при 1,5 МПа

Таблица 2. – Результаты, полученные при гиперзвуковой металлизации псевдосплавов

№	Материал тугоплавкой проволоки	Диаметр тугоплавкой проволоки, мм	Материал легкоплавкой проволоки	Диаметр легкоплавкой проволоки, мм	Результаты металлизации, качество покрытия
1	сталь	2,0	алюминий	1,6	Имеются дефектные участки покрытия
2	то же	2,0	то же	2,0	Имеются дефектные участки покрытия
3	"-	2,0	"-	2,4	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
4	"-	2,0	"-	2,5	Имеются дефектные участки покрытия
5	"-	1,6	"-	1,8	Имеются дефектные участки покрытия
6	"-	1,6	"-	2,0	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
7	"-	2,0	"-	2,0	Процесс не стабилен
8	"-	2,0	бронза	2,0	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
9	"-	2,0	то же	2,2	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
10	"-	2,0	"-	2,5	Процесс не стабилен
11	"-	1,8	"-	2,0	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
12	"-	1,8	"-	2,2	Имеются дефектные участки покрытия
13	"-	2,0	цинк	1,8	Процесс не стабилен
14	"-	2,0	то же	2,0	Процесс не стабилен
15	"-	2,0	"-	2,5	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
16	"-	1,6	"-	1,8	Имеются дефектные участки покрытия
17	"-	1,6	"-	2,0	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>

Окончание таблицы 2

№	Материал тугоплавкой проволоки	Диаметр тугоплавкой проволоки, мм	Материал легкоплавкой проволоки	Диаметр легкоплавкой проволоки, мм	Результаты металлизации, качество покрытия
18	бронза	2,0	алюминий	1,6	Процесс не стабилен
19	то же	2,0	то же	1,8	Имеются дефектные участки покрытия
20	"-	2,0	"-	2,0	Имеются дефектные участки покрытия
21	"-	2,0	"-	2,2	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
22	"-	2,0	"-	2,5	Имеются дефектные участки покрытия
23	"-	1,8	"-	2,0	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
24	"-	1,8	"-	2,5	Имеются дефектные участки покрытия
25	"-	2,0	цинк	1,8	Имеются дефектные участки покрытия
26	"-	2,0	"-	2,0	Процесс не стабилен
27	"-	2,0	"-	2,2	Процесс не стабилен
28	"-	2,0	"-	2,5	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
29	алюминий	2,0	цинк	2,0	Имеются дефектные участки покрытия
30	то же	2,0	то же	2,2	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
31	"-	2,0	"-	2,5	Процесс не стабилен
32	"-	1,8	"-	2,5	Процесс не стабилен
33	"-	1,8	"-	2,0	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
34	"-	1,8	"-	1,8	Имеются дефектные участки покрытия
35	"-	1,6	"-	1,8	<i>Процесс стабилен, качество покрытий хорошее</i>
36	"-	1,6	"-	2,0	Имеются дефектные участки покрытия

В ходе анализа полученных результатов были выделены три характерные группы режимов напыления и качества покрытий. В первую входили покрытия, формирование которых происходило при отсутствии стабильности процесса металлизации (перерывы, «плевки» металла). Покрытия наносились неравномерно, поверхностная пористость находилась в пределах от 3 до 10%, размер открытых пор составил от 8 до 30 мкм.

У следующей группы покрытий процесс нанесения прерывался через каждые 8...12 с, возобновляясь вновь, но при этом на покрытии образовывались дефектные участки (наплывы) из больших кусков (от 40 до 100 мкм) расплавленного материала проволок.

Третья группа характеризовалась стабильностью процесса гиперзвуковой металлизации, равномерностью формирования покрытий, низкой пористостью ($\leq 3\%$).

При математической обработке результатов получена эмпирическая зависимость между диаметром распыляемых проволок и их температурой плавления, которая описывается следующим выражением:

$$d_n/d_T = (T_T / T_n)^{0,25},$$

где d_n , T_n – соответственно диаметр (мм) и температура плавления ($^{\circ}\text{C}$) более легкоплавкой проволоки, мм; d_T , T_T – диаметр (мм) и температура плавления ($^{\circ}\text{C}$) более тугоплавкой проволоки.

Отмечено также, что при распылении только сжатым воздухом (схема традиционной электродуговой металлизации) диапазон диаметров проволок, обеспечивающих стабильный процесс, несколько расширяется, что можно объяснить большей «чувствительностью» процесса гиперзвуковой металлизации, обусловленной высокими динамическими параметрами струи.

Заключение

Исследовано структурно-фазовое состояние и трибомеханические свойства покрытий псевдосплава из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T, полученного гиперзвуковой металлизацией. Установлено, что псевдосплав содержит аномально высокое количество γ -фазы (≈ 60 об.%), что вероятно связано с повышенным содержанием в нем никеля, обеспечивающего термическую стабилизацию аустенитной фазы, а также особыми условиями формирования ГМ покрытий.

Показано, что псевдосплав из высокохромистых сталей 40X13 и 12X18H10T характеризуется сравнительно невысокой твердостью 370...380 HV 10 и при этом повышенной износостойкостью в режиме трения без смазочного материала. Интенсивность массового изнашивания псевдосплава составляет $1,2 \cdot 10^{-3}$ мг/м, что соответственно в 3,8 и 12,0 раз выше, чем у газотермических покрытий из сталей 40X13 и 06X19H9T. Высокая износостойкость псевдосплава из высокохромистых сталей достигается за счет протекания в его поверхностных слоях деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, придающего им повышенную микротвердость и износостойкость, а также за счет деформационного упрочнения γ -фазы. Кроме этого, дополнительный вклад в упрочнение псевдосплава может вносить насыщение его азотом в процессе напыления.

Установлено, что при одновременном распылении проволок из материалов с различной температурой плавления («сталь-алюминий»; «сталь-бронза», «сталь-цинк», «бронза-алюминий», «бронза-цинк»; «алюминий-цинк») методом гиперзвуковой металлизации, равномерность процесса и качество покрытий достигали максимума при подключении проволоки из более тугоплавкого материала к положительному потенциалу сварочного источника, использующегося в установке ГМ.

Отмечена связь качества покрытий с соотношением диаметров распыляемых проволок из материалов с различной температурой плавления. Получена эмпирическая зависимость между диаметрами распыляемых при гиперзвуковой металлизации проволок и их температурой плавления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление валов нанесением комбинированных покрытий гиперзвуковой металлизацией / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 79–83.
2. Леонов, В.В. Материаловедение и технология композиционных материалов / В.В. Леонов, О.А. Артемьева, Е.Д. Кравцова ; СГОУВПО «Сибирский федеральный университет». – Красноярск, 2007. – 238 с.
3. Вигилянская, Н.В. Газотермическое напыление псевдосплавных покрытий / Н.В. Вигилянская, Ю.С. Борисов, И.А. Демьянов // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 48–55.
4. Белоцерковский, М.А. Перспективные материалы и технологии : в 2-х т. ; под ред. В.В. Клубовича. Т. 1. Гл. 9 / М.А. Белоцерковский, А.В. Сосновский, Д.И. Трусков // Исследование процесса гиперзвуковой металлизации стальных износ- и коррозионностойких покрытий. – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – С. 127–143.
5. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95X18 / В.А. Кукареко [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т. 13, № 7 (151). – С. 318–322.
6. Влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволоочных сталей различных классов / В.А. Кукареко [и др.] // Трение и износ. – 2013 (34). – № 6. – С. 621–627.
7. Мотяхов, М.Ф. Электродуговая сварка металлов / М.Ф. Мотяхов. – М. : Высш. шк., 1975. – 232 с.

Поступила 29.06.2018

FEATURES OF COATINGS OF PSEUDOPLANES METHOD OF HYPERSONIC METALLIZATION

**M. BELOTSEKOVSKY, A. SOSNOVSKIY, A. GRIGORCHIK,
A. ELOVIC, A. DUDAN**

The features of the formation of pseudo-alloy coatings by hypersonic metallization are investigated. The structure and properties of coatings obtained by simultaneous spraying of wires from martensitic and austenitic steels are studied. The connection between the quality of coatings formed by wires with different melting temperatures, and the ratio of their diameters, as well as the polarity of the wires to the welding current source is established.

Keywords: *pseudoplane, hypersonic metallization, structure, tribological properties.*